多尺度下的南方山地丘陵区耕地质量空间自相关分析——以江西省黎川县为例

张晗(1,2,3);赵小敏(1,3,4);欧阳真程(1,2);郭熙(1,2,3);李伟峰(1,2);匡丽花(4);叶英聪(1,2);黄聪(1,2);汪晓燕(1,2)

(1) 江西农业大学江西省鄱阳湖流域农业资源与生态重点实验室/南方粮油作物协同创新中心 南昌 330045; (2) 江西农业大学 国土资源与环境学院 南昌 330045; (3) 江西农业大学土地科学研究所 南昌 330045;(4). 南京农业大学公共管理学院 南京 210095

摘　要: 分析不同尺度下的耕地质量空间分布格局，是提高耕地质量与加强耕地保护建设的基础。选取耕地质量等别监测试点县江西省黎川县为研究区，运用加权平均法、变异系数法和空间自相关分析法，以国家级耕地质量指数为空间变量，分别从县级、乡镇级和村级尺度上探讨了耕地质量的空间关联程度及其分异规律。研究结果表明: 1)研究区耕地质量呈现出“南北高，东西低”的空间分布规律，耕地质量指数 Mora’s *I* 值表现为国家利用等指数>国家经济等指数>国家自然等指数，县级、乡镇级和村级耕地质量指数的 Moran’s *I* 值依次降低，三者均呈显著的空间正自相关集聚态势。2)随着空间尺度的不同，耕地质量指数具有不同的空间关联度，自然等指数受空间尺度影响较大，经济等指数其次，利用等指数最小。3)正相关(高-高)型和(低-低)型耕地以组团形式聚集分布，负相关(高-低)型和(低-高)型耕地无明显的集中区域，多以零星状分布。研究结果显示耕地质量空间差异对空间尺度的变化较为敏感，可为区域高标准基本农田建设、土地综合整治、耕地质量监测和耕地保护与管理分区提供借鉴参考。

关键词: 山地丘陵区; 耕地质量; 空间自相关; 空间尺度; 黎川县

中图分类号: F301.21

Multi-scale spatial autocorrelation analysis of cultivated land quality in China’s southern hillside areas: A case study of Lichuan County, Jiangxi Province*

ZHANG Han[1,2,3], ZHAO Xiaomin[1,3,4**], OUYANG Zhencheng[1,2], GUO Xi[1,2,3], LI Weifeng[1,2], KUANG Lihua[4], YE Yingcong[1,2], HUANG Cong[1,2], WANG Xiaoyan[1,2]

(1. Key Laboratory of Poyang Lake Basin Agricultural Resources and Ecology of Jiangxi Province, Jiangxi Agricultural University / Southern Regional Collaborative Innovation Center for Grain and Oil Crops in China, Nanchang 330045, China; 2. College of Land Resources and Environment, Jiangxi Agricultural University, Nanchang 330045, China; 3. Institute of Land Science, Jiangxi Agricultural University, Nanchang 330045, China; 4. College of Public Administration, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China)

Abstract: Cultivated lands are among the most fundamental resources for national food security and sustainable social development. Scientific analysis of the spatial distribution patterns and evolutionary characteristics of cultivated land quality is significant for the protection and layout optimization of cultivated lands. Analysis of the spatial distribution of cultivated land quality at different scales is the basis of cultivated land quality improvement and strengthening cultivated land protection. This paper was based on cultivated land quality monitoring experimental unit in Lichuan County in Jiangxi Province and then used weighted average, variation coefficient, and spatial autocorrelation to analyze spatial disparity characteristics of cultivated land quality. Multi-scale spatial autocorrelation analysis of cultivated land quality research is a hot research area. The innovation in this paper was the introduction of natural land grade index, use of the grade index and economic grade index as the space variable to separately explore and discuss the degree of spatial correlation and spatial disparity of cultivated land quality at county-scale, township-scale and village-scale in GIS environment. The results of the research showed that: 1) Cultivated land quality index was high in the south and north and low in the west and east in Lichuan County. When the threshold distance was 400 m, there was a significant spatial autocorrelation in cultivated land quality. The Moran’s *I* value of natural land grade index was highest, followed by economical land grade index, and land use grade index was the lowest. The Moran’s *I* value of cultivated land quality from county to township and then to village scales decreased systematically. Multi-scale spatial autocorrelation analysis of cultivated land quality exhibited a significant aggregation of global spatial distribution in Lichuan County. 2) It was found that different types of cultivated land quality indexes had remarkably different spatial correlations at different spatial scales. For the influence degree of spatial scale, land use grade index was greatly affected by spatial scale, followed by natural land index, and the economic land grade index was the weakest. For the coefficient of variation of cultivated land quality index, fluctuation in Moran’s *I* value for cultivated land at village-scale was far greater than that

at township scale. While at the same spatial scale, the coefficient of variation of natural land index was strongest, followed by economic land index and then land use index. 3) The results based on local indicators of spatial association (LISA) showed that positive spatial autocorrelation of cultivated land quality, included the high-high type and the low-low type, emerged as the shape of the cluster and in the form of group, while the negative spatial autocorrelation contained the high-low type and low-high type was fragmented in space. The results of the study showed that spatial disparity in cultivated land quality was sensitive to spatial scale. Therefore, for cultivated land quality improvement and protection, there was the need to pay more attention to spatial disparity of cultivated land quality at town scale and village scale. Also based on the difference in spatial correlation degree among the natural conditions, utilization conditions and economic benefits, it was possible to explore cultivated land quality improvement and protection measures that met actual ground situations in the study area. The results of the study provided the needed references for the construction of high-standard basic farmlands, land reclamation, regional cultivated land quality monitoring, cultivated land protection, partitioning and management of cultivated lands, cultivated land quality improvement and spatial optimization of cultivated land quality.

Keywords: Mountain-hilly area; Cultivated land quality; Spatial autocorrelation; Spatial scale; Lichuan County

耕地作为土地资源中最为宝贵的自然资源，是农业发展之要、粮食安全之基、农民立命之本。耕地质量与国家粮食安全、生态安全和社会稳定密切相关，是重要的生产、生活、生态空间，也是促进社会经济可持续发展的物质基础。一方面，当前人均耕地不足、优质耕地少、耕地后备资源不断减少是我国基本的土地国情[1]，这使我国耕地质量管理和耕地保护一直保持着较大的压力；另一方面，一直以来，我国农业生产始终坚持高投入、高产出的生产模式，耕地质量状况堪忧、基础地力不断下降、耕地退化面积大等问题严重。因此，着力加强耕地数量、质量和生态“三位一体”管护制度，提高耕地质量管理和建设水平工作刻不容缓。近年来，为强化我国耕地的综合生产能力，健全耕地保护补偿机制，政府管理部门和学术界在耕地质量提升和保护等方面做了诸多深入的探索和研究[2-5]，基于空间属性特征的耕地质量管理与保护成为当前研究的热点之一[6-9]。王洪波[10]和孔祥斌[11]等采用空间分析等方法分别从国家和区域尺度上分析了中国及西部地区耕地质量的空间分异规律，为耕地空间布局优化、质量提升和动态监测提供基础；李武艳等[12]发现浙江省耕地质量 3 类指数在不同尺度下均呈现出显著的空间正相关性，但省、市和县耕地质量指数的 Moran’s *I* 值依次降低，研究结果为不同级别的行政主体制定耕地保护政策提供依据。任平等[13]运用核密度计算和空间自相关等研究方法对比分析出龙泉驿区 2005—2013 年耕地区域差异较为显著，但局部空间异质性有所增强，研究结果对制定耕地保护与优化布局政策具有较高的理论和实践价值。熊昌盛等[14-15]运用 Global Moran’s *I* 和地统计学分析方法，据此分析出县级尺度所表现出的空间正相关性要强于镇级尺度，而镇际之间空间自相关性内部差异较大，对全省耕地质量分等工作、拓展研究深度和广度具有重要意义。杨建宇等[16]结合耕地的空间属性，借助空间自相关性分析方法，探究高平市耕地的自然条件、利用情况和经济水平皆表现出显著聚集性，最终基于综合质量的分析结果提出了耕地保护分区的新方法和新思路。郭晓飞等[17]采用空间自相关分析等方法分别从镇域尺度、村级尺度和斑块尺度研究其耕地自然质量的空间分布特征，为不同尺度下耕地质量监测与提升及耕地质量更新数据验收核查提供参考。总体而言，国内耕地质量空间关联性的研究已初步建立且日趋完善，极大地丰富了耕地质量的内涵，为切实提升耕地质量水平和完善耕地保护体系提供了理论基础和科学支撑。但从现有的耕地质量相关研究来看，尚存以下不足：首先，当前耕地质量空间属性和研究尺度较为单一，主要集中在宏观和中观尺度，未能全面的从微观尺度如乡镇级、村级单元综合考虑研究区耕地质量的自然属性、利用属性和经济属性的空间集聚规律，其研究成果的普适性有待进一步提高。其次，传统耕地质量度量及区划方法多采用经典统计分析法和综合分析法，缺乏从空间关联角度定量研究耕地质量的自然属性、利用属性和经济属性的空间异质性特征，难以真正反映区域内耕地质量空间差异的变化与机制。再次，国内已有的从空间角度研究耕地质量的文献相对较少，在耕地质量评价空间范围上较少关注耕地质量对研究尺度变化的敏感性。因此，在多尺度下科学合理地分析耕地质量空间分异和聚集特征已成为当今耕地质量空间变异中亟待研究的重要内容，受到越来越多的专家研究者的关注。

为弥补上述不足，本文以 2013 年为研究时点，以江西省黎川县耕地质量指数(国家自然等指数、国家利用等指数和国家经济等指数)为空间变量，基于 GIS 分析工具，运用空间自相关分析方法，从县级、乡镇级和村级等不同空间尺度层面上定量研究了黎川县耕地质量的空间集聚和异质性特征，以期为不同级别的不同行政主体制定差异化保护、精细化管理耕地政策提供科学依据。

1　研究区概况与数据来源

1.1　研究区概况

黎川县位于江西省中部偏东、抚州市东南部，地处武夷山西麓，抚河上游(26°59′~27°35′N, 116°42′~117°10′E)。县域东、西和南部三面环山，地势南高北低，由东北部、东部和南部逐渐向中部和西北部呈撮斗形倾斜，低山、高丘陵、中丘陵、低丘陵、冲积小平原为五种典型的地貌类型。黎川县属中亚热带湿润性季风气候区，又具有山区气候特征，历年平均气温为 18 ℃左右，年均日照时数 1 642.8 h，常年降水量为 1 800.8 mm。境内水系发达，河流众多，共有大小河流 84 条，总长 946 km，流域面积 1 553 km^2。全县土壤肥沃，土壤有较明显的垂直地带性分布规律，土壤类型以水稻土、潮土、红壤、山地黄壤为主，适宜多种农作物的生长。,

黎川县用地结构可以概括为“七山一水分半田，半分道路和庄园”，2013 年黎川县辖区面积 166 870.71 hm^2，耕地面积 28 847.47 hm^2，其中水田 27 887.94 hm^2，旱地 959.53 hm^2。全县辖 6 个镇、8 个乡，1 个垦殖场，共有 124 个行政村(居委会、社区及林场)。全县总人口 23.39 万人，农业人口 12.55 万人。黎川县位于我国长江中下游江南丘陵山地农林区，是典型的农业生产大县和重要商品粮生产基地，享有“国家商品粮基地县”之美誉，每年可提供商品粮 10 万余吨。黎川县作为国土资源部耕地质量监测试点县，因此，研究该区域不同尺度下耕地质量空间分异规律具有典型性和代表性。

1.2 数据来源与处理

本文以江西省黎川县为研究对象，所采用的数据来源于 2013 年黎川县国土局和农业局等。研究区所用数据包括:

1)自然条件资料: 土壤普查、水文地质调查、植被、地形地貌、农田水利设施建设、气候统计、标准耕作制度、自然灾害与灾情分析等文件成果资料。

2)社会经济资料: 农业与农业经济统计、耕地生产投入与管理水平、黎川县统计年鉴、农田基本建设资料与农作物产能资料等。

3)基础图件资料: 2013 年土地利用变更数据(图)、土地利用总体规划图、第 2 次土壤普查图、行政区划图、地形地貌图、土壤 pH 值分布图、土壤有机质分布图、土壤质地图、有效土层厚度图、灌排图和空间分辨率为 30 m 的 DEM 图等。

4)数据库资料: 2013 年黎川县耕地质量等别更新数据、第 2 次土地资源调查成果、土地利用现状数据库、农用地分等数据库和耕地地力评价数据库等。

本文基础数据处理主要参照《耕地质量等级》和《农用地质量分等规程》提供的方法及思路，对上述收集的基础资料严格审核和分类整理，所有图件资料和矢量数据比例尺为 1∶1 万，通过数据格式转换、地图投影及坐标校正，以 ArcGIS 为平台，采用 Identity analysis 对耕地要素与行政界线等基础矢量数据叠加分析，建立空间属性数据库，坐标系采用 1980 年西安平面坐标系和 1985 年国家高程基准。

2 研究方法

2.1 耕地质量指数面积加权平均法

耕地质量指数和面积属性是耕地重要的空间属性。本文采用国家级自然等指数、利用等指数别和经济等指数与行政村耕地面积进行加权平均，以研究黎川县耕地自然质量、利用质量和经济质量的总体状况及空间分异规律。国家级加权等指数越高，代表耕地质量越高；反之，则越低。考虑到较大范围尺度的空间分析难以表征耕地质量的内部差异，而以耕地图斑为空间单元进行空间自相关分析会导致结果辨识性差，故本文以行政村作为研究单元进行空间自相关分析。参照《江西省农用地分等规程》，在 ArcGIS 10.3 软件中，耕地等指数采用等间距法对耕地等别进行初步划分，国家自然等指数按照 400 分的等间距转化为国家自然等，国家利用等指数和经济等指数按照 200 分的等间距分别转化为国家利用等和国家经济等。村级耕地质量指数采用下式计算[3,14-16]:

$$R_i = \frac{R_{ij} \times S_{ij}}{\sum S_{ij}} \tag{1}$$

式中: R_i 为第 i 个行政村的国家级平均耕地质量指数; R_{ij} 代表第 i 个行政村中第 j 块图斑的国家级耕地质量指数; S_{ij} 代表第 i 个行政村中第 j 块耕地的图斑地类面积。

2.2 全局空间自相关

Global Moran’s *I* 指数可以全面测度区域空间要素属性值聚合或离散的程度。基于 ArcGIS10.3 和 GeoDa 软件平台。本文运用全局 Moran’s *I* 指数验证黎川县和下辖各乡镇的耕地质量指数的空间依赖程度。Global Moran’s *I* 指数的取值范围在[−1, 1]之间，I>0 表示空间正相关，研究对象趋于空间聚合特征; I<0 表示空间负相关，研究对象趋于空间离散特征; I=0 则表示没有通过局部的 Moran’s *I* 显著性检验，研究对象随机分布。

一般用 Z_{score} 值进行显著性检验，当 Z_{score}>1.96 或 Z_{score}<–1.96(α =0.05)时，表明耕地质量在空间上存在显著的空间自相关性。全局空间自相关模型如下[3,12]:

$$I = \frac{n\sum_{i=1}^{n}\sum_{j\neq i}^{n} w_{ij}\left(x_i - \bar{x}\right)\left(x_j - \bar{x}\right)}{\sum_{i=1}^{n}\sum_{j\neq i}^{n} w_{ij}\left(x_i - \bar{x}\right)^2} \tag{2}$$

$$Z_{score} = \frac{I - E(I)}{\sqrt{VAR(I)}} \tag{3}$$

式中: n 代表研究对象的个数，W_{ij} 代表空间要素 i 和要素 j 的权重，$x_i - \bar{x}$ 和 $x_j - \bar{x}$ 分别是第 i、j 个空间单元上的观测值与平均值的偏差; Z_{score} 代表标准化统计量的阈值，$E(I)$为观测变量自相关性的期望，VAR(I)代表方差。

2.3　局部空间自相关

局部 Moran's I 指数是对整个区域耕地分布的空间自相关程度进行描述，能以图形的形式直观地展现研究区耕地质量的空间集聚状况。本文以黎川县村级耕地质量指数进行局部空间自相关分析，采用耕地质量指数 LISA(local indicators of spatial association)集聚图分析黎川县耕地质量集聚或离散的空间位置。耕地质量指数按 HH(高-高)型、LL(低-低)型、HL(高-低)型、LH(低-高)型、NN(非显著相关)型划分为 5 种不同类型。其中，HH 型和 LL 型为正相关类型，表示耕地质量空间聚合程度较高; LL 型和 HL 型为负相关类型，表示耕地质量空间结构呈离散特性; NN 为非显著相关型，表示耕地质量无明显的集合或离散特性。局部 Moran's I 指数通常用 LISA 统计量表示，局部空间自相关计算模型如下[3,12]:

$$I = \frac{\sum_{j=1, j\neq i}^{n} w_{ij}\left(x_i - \bar{x}\right)\left(x_j - \bar{x}\right)}{\sum_{i=1}^{n}\left(x_i - \bar{x}\right)^2} \tag{4}$$

式中局部空间自相关变量的含义同上式(2)。

2.4　变异系数

变异系数是标准差与平均数的比值，其大小反映了数据之间的集聚或离散程度，且不受研究变量的测量尺度和量纲的影响。为客观地分析和比较不同空间尺度下耕地质量空间关联的敏感性程度，采用变异系数来度量耕地质量的空间内部差异。一般来说，变异系数越小，耕地质量空间自相关性波动幅度越小，反之，波动幅度则越大。具体公式如下:

$$C_v = \sqrt{\sum_{i=1}^{n}\left(y_i - \bar{y}\right)/(n-1)} \Big/ \bar{y} \tag{5}$$

式中: Cv 表示研究变量的变异系数，n 代表某一空间尺度下研究对象的个数，y_i 代表某一空间尺度下第 i 个单元耕地质量的 Moran's I 值，$\bar{y}$ 为 y_i 平均值。

3　结果与分析

3.1　耕地质量空间分布特征

耕地的自然条件、利用水平、经济状况的优劣是衡量耕地质量高低的重要依据，耕地质量通常采用自然等指数、利用等指数以及经济等指数来描述，在耕地质量 3 种类型中，自然质量是基础，利用质量是重要保障，而经济质量直接关联实际，耕地经济质量的优劣则反映了耕地的自然质量和利用水平。在 ArcGIS10.3 软件中，根据公式(1)将以耕地图斑为研究单元的耕地质量指数转换为村级耕地质量指数及其对应的耕地等别，得到了 3 种类型的村级耕地质量空间分布图(图 2)。从图 2 可知，黎川县国家自然等指数主要集中在 2 400~2 800 之间，整体处于较低水平，除德胜镇各村外绝大部分区域耕地质量位于高值区；在空间上呈现出南部、北部及西部高于东部的空间分布特征。国家利用等指数主要集中在 1 600~2 000 之间，整体处于较高水平，耕地质量高值区主要分布在县域北部、中部及西南部，低值区主要分布在县域的西部及东部区域；在空间上呈现出“南北高、东西低”的空间分布规律。国家经济等指数与国家利用等指数分布特征在空间上趋于一致，但存在略微差异，主要表现为其耕地质量高值区与低值区的分布范围相对于利用

等指数有所扩展。

3.2 空间权重的构建

为了进一步刻画不同尺度下空间距离对研究区耕地质量全局 Moran's *I* 指数的变化规律和耕地质量的空间聚类程度的影响，以 100 m 为起点距离，步长 100 m 设置增量距离，3 000 m 为终点距离进行全局空间自相关分析，不同尺度下空间自相关结果如图 3 所示。由图 3 可知，国家级耕地质量指数在空间上具有一定的空间自相关和空间聚集规律。国家自然等指数、利用等指数和经济等指数 Moran's *I* 值在 100~3 000 m 时基本大于 0.3，表示耕地质量空间正相关性较强，存在较显著的空间聚集规律。Moran's *I* 值在 100~400 m 时呈现出先急剧增加，后缓慢减少的线性分布，当阈值距离至 400 m 时，国家级自然等指数、利用等指数和经济等指数 Moran's *I* 值达到峰值，分别为 0.474 8、0.621 4 和 0.512 2，此时耕地质量空间正自相关性聚集特性最强；随着阈值距离继续增加到 3 000 m 时，Moran's *I* 值开始呈下降趋势，但下降幅度有所放缓。由空间自相关统计结果可知，当阈值距离为 400 m 时，耕地质量的空间自相关性最强，且由阈值距离计算得到的显著性统计量 P 均为 0($P<0.05$)，表明以 400 m 为阈值距离构建空间权重和进行空间自相关分析具有较高的精确度，因此本文以固定距离 400 m 为阈值对耕地质量指数进行空间自相关分析。

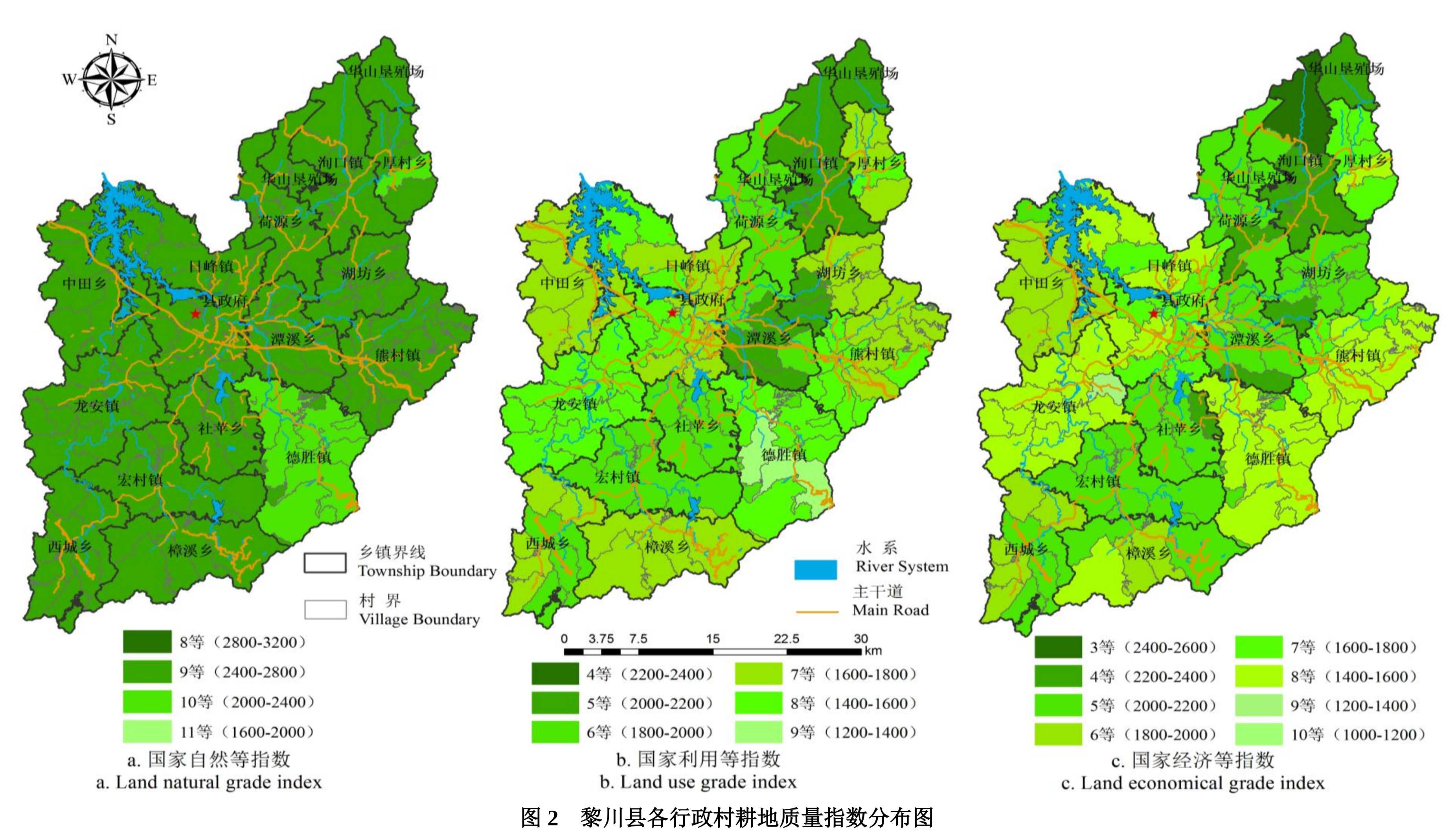


图 2　黎川县各行政村耕地质量指数分布图

Fig. 2　Distribution maps of cultivated land quality indexes on village scale of Lichuan County

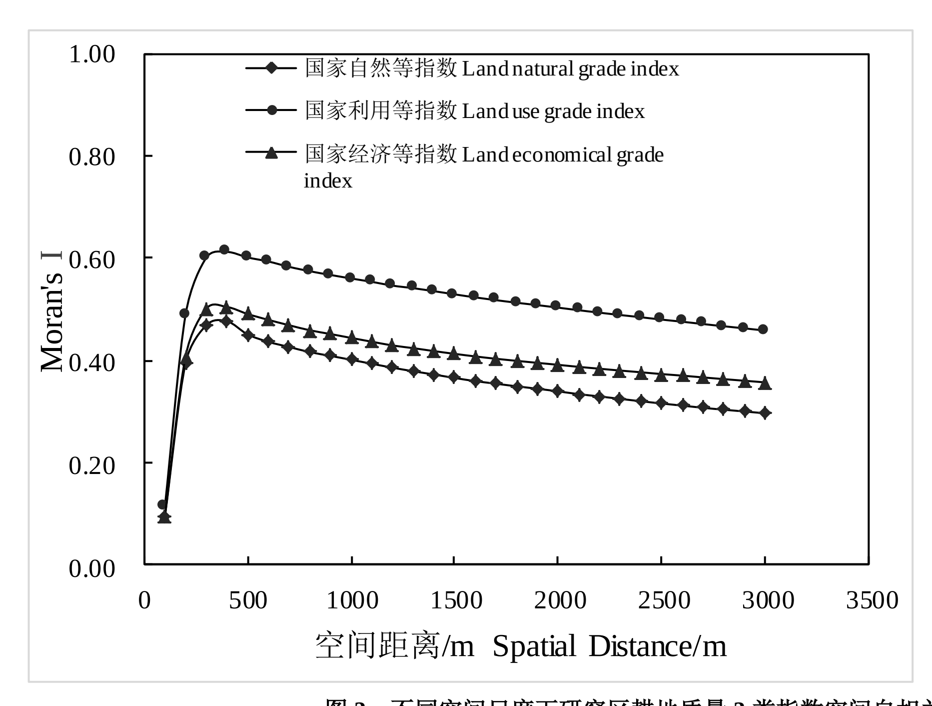


图 3　不同空间尺度下研究区耕地质量 3 类指数空间自相关图

Fig. 3　Spatial autocorrelation of cultivated land quality indexes in different spatial scales

3.3　县级尺度下耕地质量空间自相关分析

为了探讨耕地质量 3 类指数在县域尺度上的空间关联程度，本文以黎川县耕地图斑为基本空间单元，借助 ArcGIS10.3 和 GeoDa 软件平台计算 2015 年黎川县耕地质量国家自然等指数、利用等指数和经济等指数的全局 Moran's *I* 指数。由表 1 可知，黎川县耕地质量指数均大于 0.45，且显著性检验 *P* 值均为 0，明显小于显著性水平 0.05，表明黎川县耕地质量在不同层次表现出很强的空间正自相关集聚态势。但从 3 个不同类型耕地质量等指数的 Moran's *I* 值大小来看，国家利用等指数>国家经济等指数>国家自然等指数，表明黎川县耕地利用质量和所表现的空间正相关集聚特性相对较强，其空间变异性相对较弱，耕地经济质量其次，而耕地自然质量所表现出的空间正相关集聚特性相对最弱，其空间变异性相对较强。黎川县耕地质量在空间上具有显著的相关性，但是也存在较大差异，耕地利用质量的空间自相关性远远大于自然质量和经济质量，耕地经济质量、自然质量和利用质量空间聚合特性且呈现出递增的态势。对耕地长期的重用轻养，过度施用化肥、有机肥施用相对不足，耕地管理与利用水平不高，农业结构调整，耕作成本增加，非农建设大量占用优质耕地，耕地地力下降等是研究区耕地质量空间差异的主要原因。

表 1　黎川县耕地质量指数 Moran's *I* 值

Table 1　Global Moran's *I* values of land quality indexes in Lichuan County

耕地质量指数 Land quality index	Moran's *I*	Z_{score}	*P*	标准化统计量阈值 Threshold value (α =0.05)
国家自然等指数 Land natural grade index	0.474 8	109.36	0	1.96
国家利用等指数 Land use grade index	0.621 4	146.47	0	1.96
国家经济等指数 Land economical grade index	0.512 2	120.73	0	1.96

3.4　乡镇级尺度下耕地质量空间自相关分析

较小尺度的空间自相关分析能够反映研究区耕地质量的内部差异和细部特征。本文以研究区及下辖 15 个乡镇的耕地质量 3 类指数为研究单元进行 Global Moran's *I* 值分析，得到了各乡镇耕地质量指数 Moran's *I* 值及空间差异情况。从表 2 可发现以下特征：1)乡镇级和县级水平耕地质量指数 Moran's *I* 都存在国家利用等指数>国家经济等指数>国家自然等指数的递减关系。2)在同一乡镇级水平，耕地质量国家自然等指数、经济等指数和利用等指数的 Moran's *I* 值内部差异及变异系数呈现出递减的态势。国家自然等指数的波动幅度最大，变异系数为 50.40%；国家经济等指数其次，变异系数为 50.21%；国家利用等指数波动幅度最小，变异系数为 47.34%。3)不同尺度下，乡镇级尺度与县级尺度之间 Moran's *I* 值存在一定的差距。其中，15 个

乡镇的国家自然等指数和国家利用等指数均低于县级水平，仅有 1 个乡镇的国家经济等指数值高于县级水平。4)不同的空间尺度，耕地质量指数 Moran's *I* 值具有不同的空间关联度，自然等指数受空间尺度影响较大，经济等指数其次，利用等指数最小。5)受到自然环境和社会经济条件等多种因素的影响，15 个乡镇的耕地质量 3 类指数之间的 Moran's *I* 值变化也较为复杂。其中，厚村乡等 5 个乡镇耕地质量 Moran's *I* 值与县级水平变化方向一致；宏村镇等 10 个乡镇利用等指数 Moran's *I* 值大于自然等指数，但又小于经济等指数(荷源乡等 7 个乡镇除外)。6)从耕地综合指数的 Moran's *I* 值对比来看，德胜镇、日峰镇和中田乡 3 个乡镇的综合质量较优，潭溪乡和华山垦殖场的综合质量相对较差。7)空间上，耕地质量 3 类指数 Moran's *I* 值大致呈现出“西南-东北高，西北-东南低”的空间格局，国家级利用等指数的高值区明显要多于自然等指数和经济等指数。

表 2　黎川县各乡镇耕地质量指数 Moran's *I* 值

Table 2　Global Moran's *I* values of land quality indexes in towns of Lichuan County

乡镇名称 Town name	国家自然等指数 Land natural grade index	国家利用等指数 Land use grade index	国家经济等指数 Land economical grade index
德胜镇 Desheng Town	0.399 2	0.459 3	0.222 4
荷源乡 Heyuan Town	0.195 9	0.163 3	0.159 7
宏村镇 Hongcun Town	0.207 5	0.227 5	0.234 5
厚村乡 Houcun Town	0.180 2	0.305 7	0.234 6
湖坊乡 Hufang Town	0.125 8	0.354 0	0.193 8
龙安镇 Longan Town	0.189 8	0.170 3	0.325 5
日峰镇 Rifeng Town	0.444 6	0.481 0	0.290 0
社苹乡 Sheping Town	0.189 9	0.115 8	0.168 7
潭溪乡 Tanxi Town	0.068 2	0.206 2	0.142 5
西城乡 Xicheng Town	0.110 1	0.368 0	0.243 2
熊村镇 Xiongcun Town	0.150 4	0.178 2	0.403 3
洵口镇 Xunkou Town	0.167 2	0.115 4	0.161 0
樟溪乡 Zhangxi Town	0.155 6	0.263 5	0.625 8
中田乡 Zhongtian Town	0.346 8	0.371 6	0.347 3
华山垦殖场 Huashan Farm	0.220 7	0.122 4	0.122 3
乡镇平均值 Average	0.210 1	0.260 1	0.258 3

3.5　村级尺度下耕地质量空间自相关分析

黎川县辖区共有 124 个行政村(含居委会及林场等)，其中沙坑村等 8 个行政村因无耕地或耕地面积较少未进行耕地质量空间自相关分析，最终以 116 个行政村为研究单元进行空间自相关分析。

从图 4 可知，黎川县 116 个村级耕地质量的空间差异特征比县级、乡镇级更为复杂。耕地质量 3 个不同层次的 Moran's *I* 值存在较大差异。其中，孔洲村的国家自然等指数 Moran's *I* 值最高，为 0.559 6，华山林场的 Moran's *I* 值最低为–0.300 0；德胜村的国家利用等指数 Moran's *I* 值最高，为 0.510 8，中洲村的 Moran's *I* 值最低为–0.153 8；孔洲村的国家利用等指数 Moran's *I* 值最高，为 0.686 8，中洲村的 Moran's *I* 值最低为–0.081 6。耕地质量 3 类指数 Moran's *I* 值为负值区域在空间上分布大体一致。国家自然指数中 Moran's *I* 值小于 0 的有 10 个行政村，主要是因为这些区域地处山区，地形复杂，海拔相对较高，自然条件较差，耕地分布较少；国家利用指数中 Moran's *I* 值小于 0 的有 15 个行政村，除自然条件相对较差之外，在利用效益方面也相对较低，以致于耕地分布较为稀疏；国家经济指数中 Moran's *I* 值小于 0 的有 13 个行政村，除自然条件和利用相对较差外，交通不便，离县城较远，经济发展水平相对落后。

在空间分布上，耕地质量 3 类指数的全局 Moran's *I* 值均呈“南高北低，西高东低”的分布规律，3 类指数的 Moran's *I* 值高值区主要集中在西南部、西北部、东北部等低丘或冲积小平原区域。国家利用等指数 Moran's *I* 值高值聚集区域最大，利用等指数其次，自然等指数最低，且国家利用等指数值区明显多于国家经济等指数和国家自然等指数。耕地自然条件方面，丰南村、茅店村及沙坑村等 15 个行政村位于县域东部、西部和南部山区，地形复杂，自然条件较差；孔洲村、中田村及洵口村等 22 个行政村位于低丘陵、冲积平原地区，地势平缓，海拔较低，自然状况较优，耕地分布较为集中。耕地利用状况方面，利用状况较差的区域与自然状况较劣的区域分布一致，而利用质量较高的耕地主要分布在县域西南部的孔洲村等 6 个行政村，西北部的连源村等 8 个行政村及东北部的洵口村等 4 个行政村。耕地经济条件方面，经济状况较差的区域与利用条件较为相似，但存在略微差异，主要体现在利用质量高值区分布范围较利用等指数有所减小。

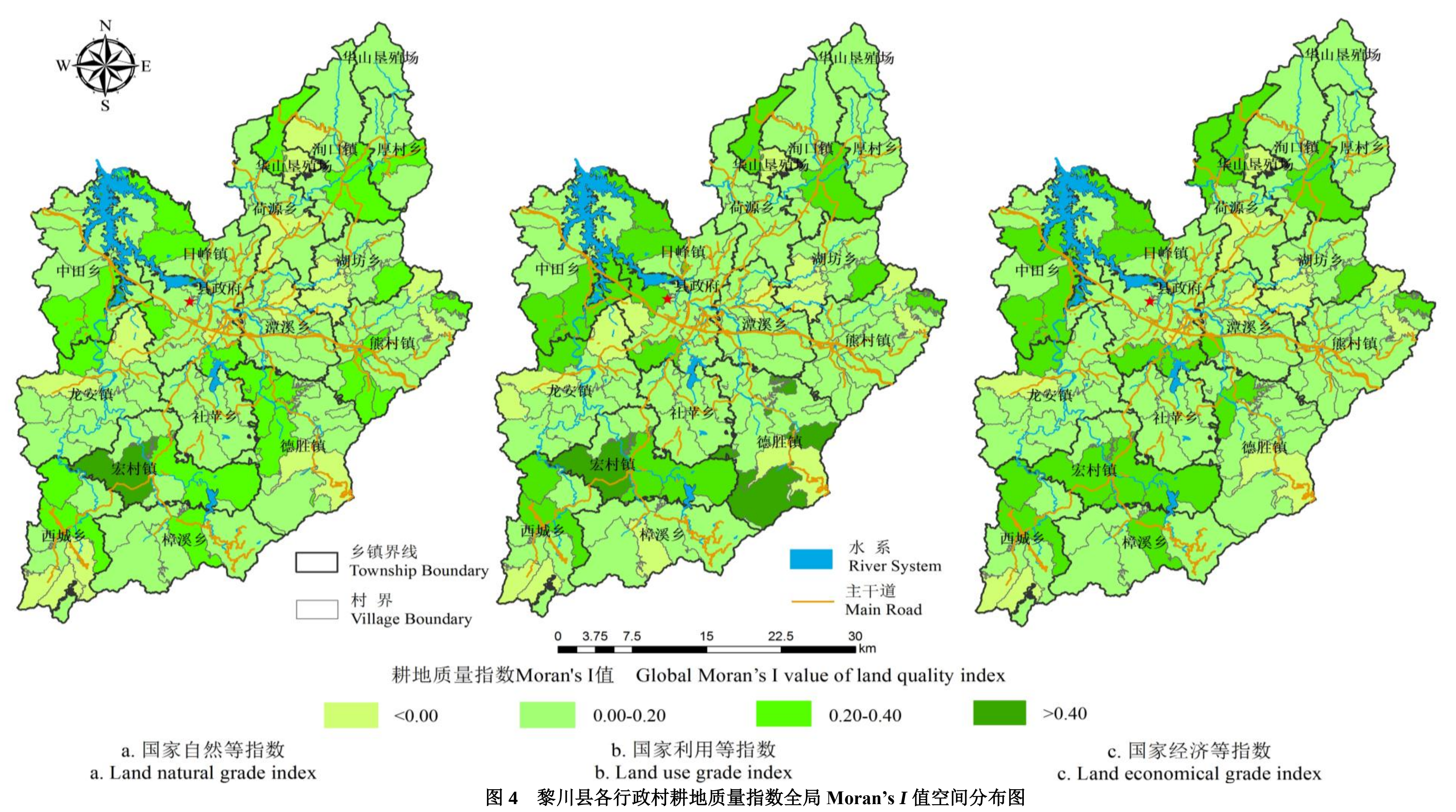


图 4　黎川县各行政村耕地质量指数全局 Moran’s *I* 值空间分布图

Fig. 4　Spatial distribution maps of Global Moran’s *I* values of land quality indexes on village scale of Lichuan County

3.6 局部空间自相关分析

基于阈值距离构建空间权重矩阵，对研究区村级耕地质量指数进行局部空间自相关分析，得到了耕地质量局部空间自相关类型统计结果与 LISA 集聚图。研究结果表明：在 95%的置信度水平下，县域耕地质量在空间上表现为正相关聚集特性，且大部分行政村耕地质量指数表现为非显著型，耕地质量正相关 HH 型主要以组团形式分布在县域西南部、中部及东北部冲击小平原区域, LL 型主要以组团形式分布在县域的西南部、西北部及东部山地丘陵区域，负相关 HL 型和 LH 型面积较小，无明显的集中区域，多以零星状分布(图 5)。耕地质量局部空间正自相关显著程度与全局空间自相关分析结果相一致，表现为由国家利用等指数、国家经济等指数和国家自然等指数依次递减的顺序。

由图 5a 可知，国家自然等指数 HH 型呈组团状集中在县域西南部、西北部、东北部及东部的河流冲击小平原区域，主要包括宏村镇、中田乡、洵口镇等，这些区域位于河流两侧，地势平坦，土壤肥沃，有机质含量高，耕层质地优良,排灌设施完善，离水源地近，交通便利，耕作自然条件优越；LL 型呈组团状集中在县域西南部、东南部及东北部地区，主要包括龙安镇、德胜镇、湖坊乡及厚村乡等，这些区域地处山地丘陵区，海拔相对较高，山岭纵横，地形起伏大，金、铜、钨等资源丰富，但耕层较薄，排灌条件较差，土壤养分贫瘠，耕地自然条件相对较差；HL 型和 LH 型呈零星状分布在县域东北部、东部及西南部，主要包括洵口镇、潭溪乡、熊村镇及宏村镇等。

由图 5b 可知，国家利用等指数 HH 型较自然等指数其分布范围有所扩展，大致呈西南-东北走向，以组团状集中在县域的宏村镇、潭溪乡及洵口镇等乡镇，这些区域地势平坦，自然条件优越，灌溉水源充足，排水通畅，加之位于铁路公路附近，交通便利，农村居民点分布密度较大，农户耕作距离较短，机械化程度高，便于耕作和管理，土地利用条件优越; LL 型呈组团状集中在县域西南部、西北部、东南部及东北部地区，主要包括龙安镇、日峰镇、熊村镇等乡镇，这些区域地形以低山区和高丘陵为主，田丘相间，地形起伏较大，土壤养分含量低，交通不便，农田水利基础设施不完善，耕地利用条件较差；同时，县城附近耕地如日峰镇受人工干扰程度较高，城镇扩张和道路建设不断侵占优质耕地，导致耕地面积变小，零星分布，边界分割度高，田块规整度及聚集度低，耕地利用质量有待提升；HL 型和 LH 型呈零星状分布在县域东北部、东部及西南部，主要包括洵口镇、潭溪乡等乡镇。

由图 5c 可知，国家经济等指数 HH 型与国家经济等指数较为相似，HH 型以组团状集中在县域的宏村镇、潭溪乡及洵口镇等乡镇，这些区域地势平坦，道路交通网络发达，灌溉水源充足，排水通畅，农村居民点分布密集，农户耕作距离较短，农业机械化水平高，便于耕作和管理，加之耕地自然条件和利用条件较优越，经济发展水平较好，耕地的投入产出效益较高；LL 型呈组团状集中在县域西南部、西北部、东南部及东北部地区，主要包括龙安镇、日峰镇及熊村镇等乡镇，这些区域地形以山地丘陵为主，地处偏远山区，地形相对闭塞，田丘相间，海拔较高，地形起伏较大，交通不便，农田水利基础设施不完善，耕地自然条件和利用状况较差，经济发展水平相对落后，对耕地的资金投入少，不利于耕地经济效益提升。同时，县城附近的乡镇如日峰镇等经济发展水平较高，但人口密集、建设用地需求量大，建设用地占用耕地和耕地非农化现象较普遍，以致于耕地种植或耕作成本大幅提高，从而降低了耕地在经济层面的质量；HL 型和 LH 型呈零星状分布在县域东北部、东部及西南部，主要包括洵口镇、荷源乡及宏村镇等乡镇。

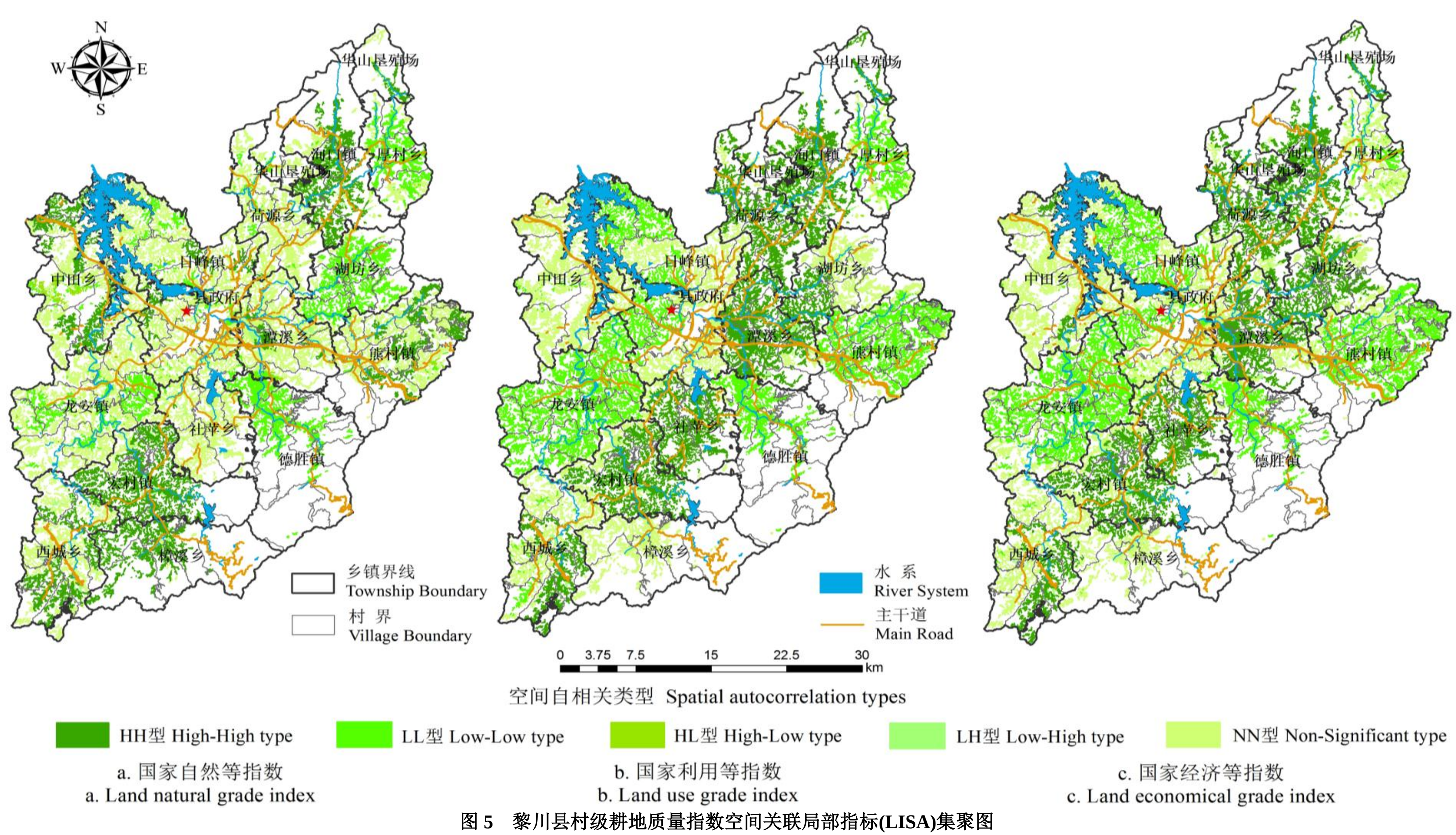


图 5 黎川县村级耕地质量指数空间关联局部指标(LISA)集聚图

Fig. 5 Cluster maps of cultivated land quality indexes with local indicators of spatial association (LISA) on village scale in Lichuan County

3.7 不同空间尺度耕地质量空间自相关对比分析

空间尺度是地理学研究中的重要内容，耕地质量的空间异质性是关于空间尺度的函数，即在不同尺度下，受到自然条件和社会经济因素等的影响，同一研究变量其空间关联程度也存在诸多差异，具体表现为研究变量的空间异质性可能会有所增强或减弱[18]。耕地质量的保护和提升是各级政府管理部门的重要任务，本文以县、乡镇以及行政村为空间尺度，探讨不同尺度下耕地质量的空间差异特征，研究区县级、乡镇级以及村级水平的耕地质量 Moran's *I* 值变化情况(表 3)。

从表 3 可知，研究区不同空间尺度下 3 种类型的耕地质量指数的空间分布结果较为相似，但同一等别指数在不同尺度下研究结果存在一定差异。

1)从同一尺度耕地质量 Moran's *I* 平均值来看，研究区耕地质量 3 类指数在空间上均表现出显著的空间正相关特性。耕地利用质量表现出的空间正相关性最强，经济质量其次，自然质量最弱。从耕地质量指数 3 个层面的 Moran's *I* 值的变异系数表现为自然等指数>经济等指数>利用等指数，即自然等指数的 Global Moran's *I* 值波动幅度最大，经济等指数次之，利用等指数最小。这造成耕地质量空间变异性逐渐增加，耕地的集聚性逐渐减少。

2)不同的空间尺度，耕地质量 Moran's *I* 平均值也存在一定差异。3 类耕地质量指数的 Moran's *I* 平均值均县级>乡镇级>村级，说明随着空间尺度增大，耕地地块也相应增加，更小尺度的空间格局与结构特征被大尺度掩盖，耕地质量的空间自相关性越强。从耕地质量 3 类指数的 Moran's *I* 值变异系数(波动幅度)为村级>乡镇级(表 3)，表明村级的耕地质量 Moran's *I* 值的波动幅度要远远大于乡镇级水平。

表 3 不同空间尺度下的耕地质量全局 Moran's *I* 值

Table 3 Global Moran's *I* values of cultivated land quality indexes on different spatial scales in Lichuan County

项目 Item	尺度 Scale	国家自然等指数 Land natural grade index	国家利用等指数 Land use grade index	国家经济等指数 Land economical grade index
平均值 Mean	县级 County	0.474 8	0.621 4	0.512 2
	乡镇级 Township	0.210 1	0.260 1	0.258 3
	村级 Village	0.143 5	0.147 9	0.146 8
变异系数 Coefficient of variation	乡镇级 Township	0.504 0	0.473 4	0.502 1
	村级 Village	0.788 2	0.773 6	0.784 4

4 结论与讨论

本文通过采用全局空间自相关和局部空间自相关相结合的方法对耕地质量进行分析，以 2013 年为研究时点，选取江西省黎川县为研究区域，引入耕地国家自然等指数、国家利用等指数和国家经济等指数为空间变量，分别从县级、乡镇级和村级尺度等多维空间尺度层面定量探讨了耕地质量空间聚集规律与差异特征。

1)空间上，研究区耕地质量并非呈空间随机分布状态，在空间尺度 100~3 000 m 之间存在显著的空间自相关集聚特性，在阈值距离为 400 m 时，耕地质量的空间自相关相关性最强，表明以 400 m 为固定阈值距离构建空间权重矩阵，并进行空间自相关分析具有较高的精确度和较强的科学性。

2)黎川县耕地质量整体水平相对较高，在空间分布上呈现出一定的聚集性规律，研究区耕地质量空间分布格局与全局、局部空间自相关结果相类似。耕地质量高值区分布在县域的南部、北部及中部，低值区分布在县域的西北部和东南部，耕地质量呈现出“南北高，东西低”的空间分布规律，且耕地的经济条件总体上要优于自然状况，而要低于利用条件。局部空间自相关分析结果表明，黎川县大部分行政村耕地质量指数表现为非显著型，耕地质量正相关 HH 型主要以组团形式分布在县域西南部、中部及东北部冲击小平原区域，LL 型主要以组团形式分布在县域的西南部、西北部及东部山地丘陵区域，负相关 HL 型和 LH 型面积较小，无明显的集中区域，多以零星状分布。

3)不同层次的耕地质量类型和不同的空间尺度，耕地质量指数具有不同的空间关联度。黎川县 2015 年耕地自然质量、经济质量和利用质量 Moran's *I* 值均大于 0.45，表现出较强的空间自相关，在不同尺度下均呈现出利用等指数>经济等指数>自然等指数依次递增的态势。黎川县地理环境为“七山一水分半田，半分道路和庄园”较为复杂的自然环境导致了县、乡镇及村级范围内之间的耕地质量空间差异较大。县域尺度上的空间差异可能与耕地长期的重用轻养，耕地利用重视短期的经济效益及复杂的地形地貌等有关；乡镇尺度上，自然等指数 Moran's *I* 值主要受自然条件影响，除日峰镇、德胜镇、中田乡、华山垦殖场位于冲击小平原区地带，剩余 10 个乡镇位于山地丘陵区域，耕地少、山丘坡耕地多，耕地单元自然细碎化，因此耕地自然等指数 Moran's *I* 值低于全县水平；随着农业产业结构调整和种植结构的优化升级，大力推广有机稻生

产，扎实推进高效节水灌溉工程、洪门水库等重点水库、黎滩河等中小河流治理、农村水电扩容增效等农田水利基础设施建设，使利用等指数和经济等指数 Moran's *I* 值差异性缩小；村级尺度上，黎川县大部分行政村位于洪门水库、龙安河、黎滩河、资福河等河流两侧，地处低山丘陵和冲击小平原区域，地势虽较为平坦但地处低洼地带，排水条件较差，生态防护建设不足，时有遭受洪涝的影响，耕地畸零不整，产出效益不高，但农业结构调整、加强高标准农田建设使得水稻、烤烟、香榧、食用菌等种植业产业化水平明显提高，实现生产规模化，农民收入水平和耕地投入与管理水平不断改善，这是耕地自然状况较差，经济效益低下，耕地利用水平较高的重要原因。首先，从空间尺度上看，耕地质量 Moran's *I* 指数随着空间尺度的增加而增强，主要是受到数据平均时的滤波特性、Moran's *I* 值对距离的非线性特征及更小尺度的空间格局与结构特征被大尺度掩盖共同影响，这与谢花林[19]、邱炳文[20]等的研究结论相一致。其次，耕地质量空间集聚性的变异系数随着空间尺度的增加而减小，自然等指数受空间尺度的影响最为敏感，经济等指数其次，利用等指数最小，这与李武艳[12]、熊昌盛[14-15]等的研究结果较为相似，可能由于较小空间区域的内部结构的多样性和耕地质量的各向异性，导致其空间变异性降低。研究区耕地质量 3 类指数及其 Moran's *I* 值均呈现出“南高北低，西高东低”的分布规律，除受自然、社会经济、空间尺度、农户行为等因素综合影响，还可能与经济重心和农业产业结构的南移如“北烟南移”有关。因此，在耕地质量提升与保护过程中，应从耕地质量的空间关联程度以及其对空间尺度变化的敏感性等角度，对不同级别的空间单元的耕地质量建设和管理设置不同重点。一方面，更加重视微观尺度下乡镇及村级耕地质量的空间差异特征；另一方面，可分别从耕地自然条件、利用水平和产出效益的空间关联性的强弱差异，探索符合研究区实际情况的耕地改良手段与保护措施。当然，随着气候、生产水平和技术的改进等变化，耕地质量指数也需适时加以修正和调整，而且不同时期其空间关联性和作用机制也存在差异。因此耕地质量空间关联程度的差异化、动态化表达，也是接下来探索和研究的重要内容。

参考文献 References

[1] 陈桂坤，张蕾娜，程锋，等. 数量质量并重管理的耕地保护政策研究[J]. 中国土地科学, 2009, 23(12): 39–43

Chen G S, Zhang L N, Cheng F, et al. Cultivated land preservation policies reexamined: Paying equal attention to quantitative and qualitative management[J]. China Land Science, 2009, 23(12): 39–43

[2] 徐明岗，卢昌艾，张文菊，等. 我国耕地质量状况与提升对策[J]. 中国农业资源与区划, 2016, 37(7): 8–14

Xu M G, Lu C A, Zhang W J, et al. Situation of the quality of arable land in China and improvement strategy[J]. Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning, 2016, 37(7): 8–14

[3] 韦仕川，熊昌盛，栾乔林，等. 基于耕地质量指数局部空间自相关的耕地保护分区[J]. 农业工程学报，2014，30(18): 249–256

Wei S C, Xiong C S, Luan Q L, et al. Protection zoning of arable land quality index based on local spatial autocorrelation[J]. Transactions of the CSAE, 2014, 30(18): 249–256

[4] 沈仁芳，陈美军，孔祥斌，等. 耕地质量的概念和评价与管理对策[J]. 土壤学报, 2012, 49(6): 1210–1217

Shen R F, Chen M J, Kong X B, et al. Conception and evaluation of quality of arable land and Strategies for its management[J]. Acta Pedologica Sinica, 2012, 49(6): 1210–1217

[5] 陈诚，林晨. 苏南地区耕地质量评价与分区保护研究[J]. 长江流域资源与环境, 2016, 25(12): 1860–1869

Chen C, Lin C. Cultivated land quality assessment and protection zoning in southern Jiangsu[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2016, 25(12): 1860–1869

[6] 杨永侠，王旭，孟丹，等. 基于空间自相关的耕地等别指数检验方法研究[J]. 农业机械学报, 2016, 47(5): 328–335

Yang Y X, Wang X, Meng D, et al. Test method of cultivated land grading index based on spatial autocorrelation[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(5): 328–335

[7] 张贞，魏朝富，尚慧. 丘陵山区耕地质量的空间格局分析[J]. 长江流域资源与环境, 2010, 19(8): 901–907

Zhang Z, Wei C F, Shang H. Spatial pattern analysis based on modified cultivated quality grades in hilly area[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2010, 19(8): 901–907

[8] 杨建宇，杜贞容，杜振博，等. 基于耕地质量评价和局部空间自相关的高标准农田划定[J]. 农业机械学报，2017，48(6): 109–115

Yang J Y, Du Z R, Du Z B, et al. Well-facilitied capital farmland assignment based on land quality evaluation and LISA[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(6): 109–115

[9] 陈藜藜，宋戈，邹朝晖，等. 基于改进局部空间自相关分析的萝北县耕地保护分区[J]. 资源科学，2016，38(10): 1871–1882

Chen L L, Song G, Zou C H, et al. Zoning of protected cultivated land based on improved local indicators of spatial association[J].

Resources Science, 2016, 38(10): 1871–1882
[10] 王洪波, 程锋, 张中帆, 等. 中国耕地等别分异特性及其对耕地保护的影响[J]. 农业工程学报, 2011, 27(11): 1–8
Wang H B, Cheng F, Zhang Z F, et al. Differential characteristics of cultivated land grade and its effect on cultivated land protection in China[J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(11): 1–8
[11] 孔祥斌, 张青璞. 中国西部区耕地等别空间分布特征[J]. 农业工程学报, 2012, 28(22): 1–7
Kong X B, Zhang Q P. Spatial distribution characteristics of arable land grade in western China[J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(22): 1–7
[12] 李武艳, 朱从谋, 王华, 等. 浙江省耕地质量多尺度空间自相关分析[J]. 农业工程学报, 2016, 32(23): 239–245
Li W Y, Zhu C M, Wang H, et al. Multi-scale spatial autocorrelation analysis of cultivated land quality in Zhejiang Province[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(23): 239–245
[13] 任平, 吴涛, 周介铭. 基于 GIS 和空间自相关模型的耕地空间分布格局及变化特征分析——以成都市龙泉驿区为例[J]. 中国生态农业学报, 2016, 24(3): 325–334
Ren P, Wu T, Zhou J M. Analysis of spatial distribution pattern and evolutionary characteristics of cultivated lands based on spatial autocorrelation model and GIS platform—A case study of Longquanyi District, Chengdu, China[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2016, 24(3): 325–334
[14] 熊昌盛, 韦仕川, 栾乔林, 等. 基于 Moran's I 分析方法的耕地质量空间差异研究——以广东省广宁县为例[J]. 资源科学, 2014, 36(10): 2066–2074
Xiong C S, Wei S C, Luan Q L, et al. Spatial pattern disparity and cultivated land quality based on Moran's I analysis[J]. Resources Science, 2014, 36(10): 2066–2074
[15] 熊昌盛, 栾乔林, 韦仕川. 基于空间自相关的耕地质量分布格局[J]. 地域研究与开发, 2016, 35(5): 128–132
Xiong C S, Luan Q L, Wei S C. Spatial pattern disparity of arable land quality based on spatial autocorrelation analysis[J]. Areal Research and Development, 2016, 35(5): 128–132
[16] 杨建宇, 徐凡, 赵龙, 等. 基于综合质量空间自相关性分析的耕地保护分区方法[J]. 农业机械学报, 2017, 48(3): 156–163
Yang J Y, Xu F, Zhao L, et al. Protection zoning of cultivated land comprehensive quality based on spatial autocorrelation[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(3): 156–163
[17] 郭晓飞, 李建华, 李成学, 等. 基于多尺度的祥云县县域耕地自然质量空间分布特征分析[J]. 云南农业大学学报: 自然科学, 2016, 31(5): 923–929
Guo X F, Li J H, Li C X, et al. Spatial distribution features for natural quality of cultivated land at county levels based on multi-scale in Xiangyun County[J]. Journal of Yunnan Agricultural University: Natural Science, 2016, 31(5): 923–929
[18] 杨奇勇, 杨劲松, 余世鹏, 等. 不同尺度下耕地土壤 Cr 含量的空间自相关性分析[J]. 应用与环境生物学报, 2011, 17(3): 393–397
Yang Q Y, Yang J S, Yu S P, et al. Spatial autocorrelation analysis of Cr content in cultivated soil at different scales[J]. Chinese Journal of Applied & Environmental Biology, 2011, 17(3): 393–397
[19] 谢花林, 刘黎明, 李波, 等. 土地利用变化的多尺度空间自相关分析——以内蒙古翁牛特旗为例[J]. 地理学报, 2006, 61(4): 389–400
Xie H L, Liu L M, Li B, et al. Spatial autocorrelation analysis of multi-scale land use changes: A case study in Ongniud Banner, Inner Mongolia[J]. Acta Geographica Sinica, 2006, 61(4): 389–400
[20] 邱炳文, 王钦敏, 陈崇成, 等. 福建省土地利用多尺度空间自相关分析[J]. 自然资源学报, 2007, 22(2): 311–320
Qiu B W, Wang Q M, Chen C C, et al. Spatial autocorrelation analysis of multi-scale land use in Fujian Province[J]. Journal of Natural Resources, 2007, 22(2): 311–320